Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics

Page Journal: mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

Society of Manufacturing Engineering of Iran

Numerical Study of Flow and Heat Transfer in Cavity Receiver Tube of a Solar Power Tower with Different Inserts under Non-Uniform Heat Flux

Research Article

Siavash Zeynalpour[1], Zahra Mehrdoost[2]

DOI: 10.22067/jacsm.2022.76201.1111

1. Introduction

The solar central cavity receiver is widely used in solar thermal tower power plants. However, due to the concentrating sun rays reflected from heliostats mirrors, the solar flux in the central part of receiver tubes surfaces is much higher than the edges that cause the greatly non-uniform temperature distribution. Many researchers have tried to reduce the large heat flux gradient through changing the arrangement of heliostat mirrors, different working fluid, and different insert configurations.

This research studied the impacts of four types of insert configurations on heat transfer performance of solar cavity receiver tube. The HFCAL method was applied to calculate the actual non-uniform heat flux distribution on the receiver tubes. The impacts of insert configurations, pitch and thickness of inserts, and positions of inserts were investigated.

2. Governing equations

The fluid considered in the receiver tubes is molten nitrate salt, which has a high energy storage capacity. According to the previous studies, the standard high-*Rek*-ε model with the standard wall functions can predict the heat transfer and friction of the molten salts in turbulent tube flow suitably. The governing equations can be expressed as follows:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=0 \tag{1}$$

$$\rho\frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_i}=-\frac{\partial P}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu+\mu_t)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\delta_{ij}\right)\right] \tag{2}$$

$$\rho\frac{\partial(u_i h)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[C_p\left(\frac{\mu}{Pr}+\frac{\mu_t}{Pr_t}\right)\frac{\partial T}{\partial x_i}\right] \tag{3}$$

$$\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}+\mu_t\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\rho\varepsilon \tag{4}$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_i}+\frac{\varepsilon c_1}{k}\mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-c_2\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{5}$$

The temperature-dependent thermophysical properties of the molten nitrate salt, including viscosity, density, conductivity, and specific heat capacity are defined as piecewise functions:

$$\mu=0.23816-1.2768\text{E}-3T+2.6275\text{E}-6T^2-2.4331\text{E}-9T^3+8.507\text{E}-13T^4,\ \text{Pa s} \tag{6}$$

$$\rho=2280.22-0.733T,\ \text{kg m}^{-3} \tag{7}$$

$$K=0.7663-6.47\text{E}-4T,\ \text{W(mK)}^{-1} \tag{8}$$

$$c_p=1560,\ \text{J(kgK)}^{-1} \tag{9}$$

3. Model description

Four types of inserts configurations are considered to improve the performance of receiver tubes: 1) twisted tape; 2) wavy tape; 3) helical screw tape; and 4) louvered strip. Figure 1 shows the geometrical dimensions of the inserts.

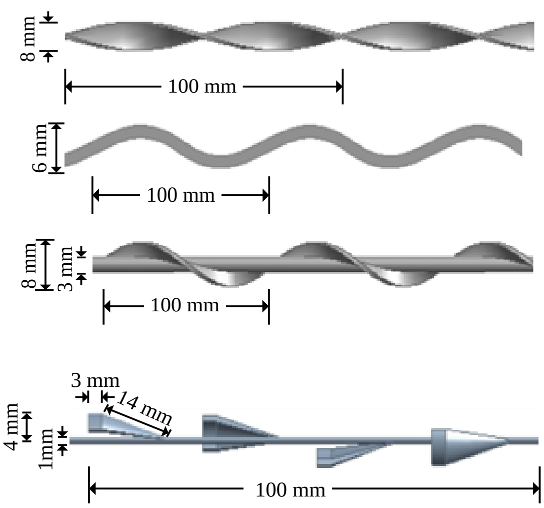


Figure 1. The Geometric dimensions of the inserts

---

*Manuscript received: April 13, 2022. Revised, September 28, 2022, Accepted, December 18, 2022.

[1] MSc, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Ahvaz Branch, Ahvaz, Iran.

[2] Corresponding author. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.Email:z.mehrdoost@iauahvaz.ac.ir

4. Boundary conditions

The constant velocity and temperature are considered at the inlet of the tube and fully developed assumption is applied to the outlet. At the receiver tube outer surface, a non-uniform heat flux boundary condition is employed.Here, the non-uniform actual heat flux distribution is calculated by the HFCAL model of ten heliostats as Equation 10:

$$Flux\,(y,z)=\sum_{i=1}^{10}\frac{P_{h,i}}{2\pi\sigma_{HF,i}^{2}}e^{-\frac{(y^2+z^2)}{2\sigma_{HF,i}^{2}}} \quad (10)$$

wherey and z are the coordinates of heliostat, P_h and σ_{HF} are the total power and effective deviation in HFCAL, respectively.

5. Numerical results

In this section, the impacts of insert configurations, pitch and thickness of insert, position of insert, and the impact of non-uniform heat flux boundary condition were investigated.

The impact of inserts configurations

Figure 2 shows the variations of Nusselt numbers *Nu* with Reynolds numbers *Re* for four types of inserts. It can be observed that the wavy tape has the highest *Nu* and helical screw tape has the lowest *Nu*.

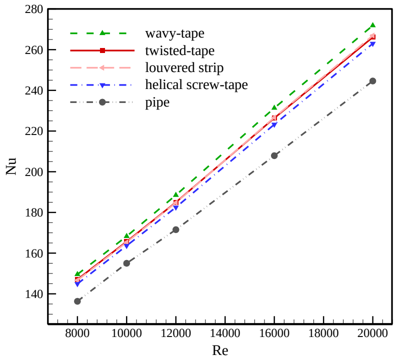


Figure 2. The Nusselt numbers versus Reynolds numbers for different inserts

The impact of insertpitch

In order to analysis the impact of insert pitch on the flow and heat transfer of receiver tubes, the wavy tape pitch is set to 40 mm, 80 mm, 60 mm and 160 mm. Figure 3 shows the Nusselt numbers *Nu* versus Reynolds numbers *Re* for different pitches of wavy tape. It can be seen that *Nu* increases when insert pitch decreases.

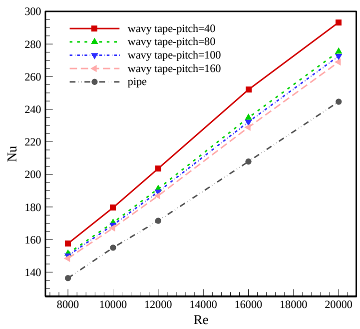


Figure 3. The Nusselt numbers versus Reynolds numbers for four differentpitches of wavy tape

The impact of insert thickness

The pitch of wavy tape is set as 100 mm in this section, and the impact of insert thickness is examined by considering three cross-section areas: 8×1 mm^2, 8×2 mm^2 and 8×3 mm^2. Figure 4 shows the variations of Nusselt numbers *Nu* with *Re* for different thickness of wavy tape. It can be seen that the thickness of wavy tape has almost no impact on *Nu*.

The impact ofposition of insert on receiver tube

To examine the impact of position of wavy tape on receiver tube, three different positions are considered: 1) placed in sunlight concentrated domain; 2) placed in the middle; and 3) placed in back-sunlight domain.
Figure 5 illustrates the variation of Nusselt numbers versus Reynolds numbers for different positions of wavy tape. It is clear that the Nusselt numbers of wavy tape placed in the back-sunlight domain are higher than those of placed in the sunlight concentrated domain because the hot fluid flow and cold fluid flow can be mixed entirely.

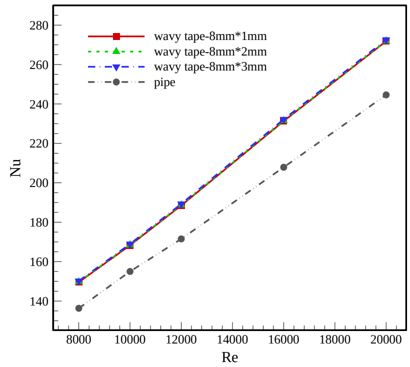


Figure 4. The Nusselt numbers versus Reynolds numbers for different thickness of wavy tape

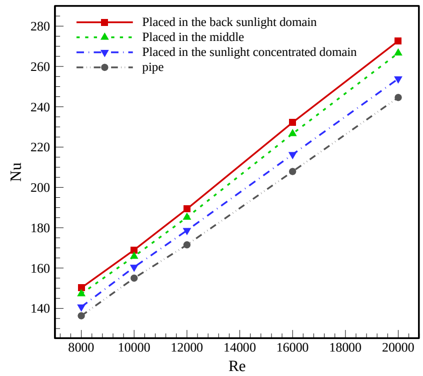


Figure 5. The Nusselt numbers versus Reynolds numbers for different positions of wavy tape

6. Conclusion

This study examined heat transfer capability of the molten nitrate salt in a receiver tube with non-uniform heat flux. Four types of inserts configurations were considered and the impacts of insert configurations, pitch and thickness of inserts and positions of inserts on heat transfer performance of receiver tube wereexamined. The following conclusions were obtained.

The wavy tape has the highest *Nu*,which is 150 when *Re* set as 8000. The Nusselt number increases when insert pitch decreases. Under the non-uniform heat flux, the best position for the insert inside receiver tube is the back-sunlight domain.

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک ،۳۵، ۱۴۰۲.(۳۶-۱۷)

علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک

http://mechanic-ferdowsi.um.ac.ir

انجمن مهندسی ساخت و تولید ایران

دانشگاه فردوسی مشهد

مطالعه عددی جریان و انتقال حرارت در لوله گیرنده حفره‌ای یک برج خورشیدی با آشوبگرهای مختلف تحت شار حرارتی غیریکنواخت *

مقاله پژوهشی

سیاوش زینل پور[۱]   زهرا مهردوست[۲]

DOI: 10.22067/jacsm.2022.76201.1111

چکیده در این مقاله، تأثیر استفاده از چهار نوع آشوبگر مختلف درون لوله گیرنده حفره‌ای برج خورشیدی به منظور بهبود انتقال حرارت و کاهش توزیع دمای غیریکنواخت بررسی شده است. شبیه‌سازی عددی به صورت سه بعدی انجام شده و تأثیر شکل آشوبگرها، موقعیت قرارگیری درون لوله گیرنده، گام و ضخامت آ شوبگر و همچنین تأثیر شار حرارتی غیریکنواخت بر عدد نا سلت، ضریب ا صطکاک و دمای سطح لوله گیرنده بررسی شده است. جریان به صورت تراکم‌ناپذیر، پایا، آشفته و عدد رینولدز در محدوده ۸۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی عددی برای چهار نوع آشوبگر نوار تابیده، نوار موج‌دار، نوار حلزونی و نوار پره‌دار نشان داد که آشوبگر نوار موج‌دار نسبت به سه نوع دیگر، دارای عدد نا سلت بالاتر و دمای متو سط کمتر روی سطح خارجی لوله گیرنده ا ست. افزایش عدد نا سلت نوار موج‌دار ن سبت به نوار پره‌دار، تابیده و حلزونی به ترتیب ٪۱/۸، ٪۲ و ٪۳/۲ و ن سبت به لوله گیرنده بدون آ شوبگر ٪۱۰ ا ست. با افزایش ضخامت آ شوبگر و کاهش گام، عدد نا سلت افزایش یافته و دمای متو سط سطح خارجی لوله گیرنده کاهش می‌یابد. برر سی موقعیت قرارگیری آ شوبگر در سه حالت نزدیک به دیواره شار حرارتی غیریکنواخت، وسط لوله و نزدیک به دیواره عایق نشان داد که با افزایش فاصله آشوبگر از ناحیه اعمال شار حرارتی غیریکنواخت، اختلاط جریان سیال گرم و سیال سرد بهتر صورت می‌گیرد و توزیع دما یکنواخت‌تر می‌شود. بنابراین بهترین موقعیت برای قرار گرفتن آشوبگر، دورترین فاصله نسبت به دیواره شار حرارتی غیریکنواخت است.

واژه‌های کلیدی برج خورشیدی، لوله گیرنده حفره‌ای، شار حرارتی غیر یکنواخت، آشوبگر، انتقال حرارت.

Numerical Study of Flow and Heat Transfer in Cavity Receiver Tube of a Solar Power Tower with Different Inserts under Non-uniform Heat Flux

Siavash Zeynalpour   Zahra Mehrdoost

Abstract *In this paper, the effect of using four different types of inserts in cavity receiver tube of solar power tower to improve heat transfer and reduce non-uniform temperature distribution is investigated. Numerical simulation is performed in three dimensions and the effect of inserts configurations, position inside receiver tube, pitch and thickness of insert and the effect of non-uniform heat flux on the Nusselt number, friction factor and temperature of outer surface of receiver tube are investigated. The flow is incompressible, steady state, turbulent and the Reynolds number is in the range of 8000 to 20000. Numerical simulation results for four types of inserts: twisted-tape, wavy-tape, helical-tape and louvered-tape show that wavy-tape compared to the other three types, has the higher Nusselt number and the lower average temperature of receiver tube surface. The Nusselt number of the wavy-tape is increased by 1.8%, 2% and 3.2% relative to the louvered-tape, twisted-tape and helical-tape, respectively and 10% relative to the receiver tube without insert. By increasing the insert thickness and decreasing the insert pitch, the Nusselt number increases and average temperature of receiver tube surface decreases. Investigating the insert position in three cases: close to the non-uniform heat flux wall, the middle of the tube and close to the insulation wall show that by increasing the distance of insert from non-uniform heat flux wall, the mixing of hot and cold fluids flow is better and the temperature distribution is more uniform. Therefore, the best position to place insert is the farthest distance from the non-uniform heat flux wall.*

Key Words Solar power tower, Cavity receiver tube, Non-uniform heat flux, Insert, Heat transfer.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۱/۲۴ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۹/۲۷ می‌باشد.

(۱) کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

Email: z.mehrdoost@iauahvaz.ac.ir

مقدمه

نیروگاه برج خورشیدی، به عنوان یک فناوری انرژی خورشیدی متمرکز، از یک برج مرکزی به عنوان کانون برای دریافت نور خورشید استفاده می‌کند. در این نیروگاه از یک میدان بزرگ از آینه‌های ردیاب خورشید به نام هلیوستات برای منعکس کردن و تمرکز نور خورشید بر روی یک گیرنده که در بالای برج نسبتاً بلندی نصب شده است، استفاده می‌شود. در نتیجه در محل تمرکز پرتوها، انرژی گرمایی زیادی بدست می‌آید که این انرژی به وسیله سیال عامل که داخل گیرنده در حرکت است، جذب شده و برای تولید توان مورد استفاده قرار می‌گیرد. سه گیرنده اصلی برج خورشیدی شامل گیرنده‌های خارجی، گیرنده‌های حفره‌ای و گیرنده‌هایحجمیوجود دارند[1].در میان این سه نوع گیرنده، گیرنده حفره‌ای دارای مزایایی همچون بازدهی تبدیل خورشیدی-حرارتیبالاتر، اتلاف حرارت بازتابی کم‌تر، اتلاف حرارت همرفتیکم‌تر، مساحت سطح انتقال حرارت بالاتر و توانایی تحمل شار بالاتر در حفره است[2]. بنابراین، گیرنده حفره‌ای مرکزی خورشیدی به طور گسترده در نیروگاه‌های برج حرارتی خورشیدی استفاده می‌شود[3,4].با این حال، به دلیل تمرکز پرتوهای منعکس شده از آینه‌های هلیوستات بر روی گیرنده، شار خورشید در بخش مرکزی سطوح جاذب حرارت دریافت‌کننده حفره‌ای بسیار بیشتر و در نتیجه توزیع دماغیر یکنواخت خواهد بود [5,6]. بنابراین لوله‌های دریافت‌کننده حرارت که درون حفره قرار می‌گیرند، تحت تأثیر تنش حرارتی غیریکنواخت و نقاط داغ محلی قرار می‌گیرند که منجر به خمیدگی و آسیب لوله‌ها می‌شود و در نتیجه قابلیت اطمینان گیرنده کاهش می‌یابد.

یو و همکاران [7]، تو و همکاران [8]، شار حرارتی و توزیع دمای گیرنده حفره‌ای برج خورشیدی را مطالعه کرده و دریافتند که شار حرارتی و توزیع دما بسیار ناهمگن هستند. بنابراین، بسیاری از محققین سعی در کاهش گرادیان شار حرارتی و اختلاف دمای محیطی لوله‌های گیرنده برای افزایش طول عمر و قابلیت اطمینان گیرنده داشته‌اند، از جمله تغییر چیدمان آینه‌های هلیوستات، انتخاب انواع مختلف سیال عامل در لوله گیرنده و به‌کارگیری پیکربندی‌های مختلف برای لوله‌های گیرنده. به عنوان مثال، در مراجع [9-11]استراتژی نقطه هدف بهینه برای تغییر آرایش آینه‌های هلیوستات پیشنهاد شده است، که می‌تواند بهترین نقطه هدف را برای هر یک از آینه‌های هلیوستات به دست آورده و توزیع شار حرارتی لوله گیرنده را همگن نموده و در نهایت تنش حرارتی لوله گیرنده را کاهش دهد. وانگ و همکاران [12] یک روش جدید از ترکیب روش ردیابی اشعه مونت‌کارلو و روش گبهارت جهت شبیه‌سازی تابش خورشیدی برای یک گیرنده حفره‌ای ارائه کرده‌اند. نتایج نشان داد که تأثیر حفره در همگن کردن توزیع شار خورشیدی در جذب سطحی پایین‌تر بیشتر است. پاسیو و همکاران [13] مزایا و معایب استفاده از سه نمونه فلز مایع را در سیستم‌های دریافت کننده مرکزی بررسی کردند و نتیجه گرفتند استفاده از فلزات مایع منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت و بهبود عملکرد سیستم می‌شود. موراکو و همکاران [14] فلز مایع را به عنوان سیالانتقال حرارت به‌کار گرفتند و نتیجه گرفتند که فلز مایع مزایای قابل‌توجهی در گیرنده برج مرکزی دارد که برای توزیع یکنواخت شار حرارتی موثر است.از طرف دیگر، محققین سعی در بهبود عملکرد گیرنده از طریق تغییر ساختار گیرنده داشته‌اند. زو و همکاران [15] یک گیرنده حفره‌ای استوانه‌ای جدید با عایق‌بندی متشکل از یک کف محصور شده در قسمت عقب، یک دریچه در قسمت جلو و یک لوله مارپیچی در داخل را توسعه دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که ساختار پیشنهادی قابلیت رسیدن به دماهای عملیاتی و بازده حرارتیبالا دارد. یانگو همکاران[16] یک گیرنده لوله حرارتی تخت دو فازی با دمای بالا را پیشنهاد کردند که می‌تواند توزیع شار حرارتی را همگن و نقاط حرارتی بر روی گیرنده را حذف کند. کاناتانی و همکاران [17] گیرنده حفره‌ای خورشیدی جدیدی را معرفی کردند که از لوله‌های حلقوی مارپیچی به عنوان جاذب حرارت استفاده می‌کرد.

یکی از روش‌های مؤثر برای کاهش گرادیان شارحرارتی و توزیع دمای غیریکنواخت، استفاده از المان‌هایی از قبیل بافل‌ها، کویل‌ها و نوارهای پیچ خورده درون لوله‌های گیرنده برای تغییر میدان جریان است. این المان‌ها باعث اختلاط بهتر جریان،کاهش ضخامت لایه مرزی و در نتیجه افزایش انتقال حرارت می‌شوند [18-21]. با توجه به تحقیقات بررسی شده، مشاهده می‌شود که بیشتر مطالعات انجام شده برای بهینه‌سازی گیرنده حفره‌ای برج خورشیدی، بر تغییر چیدمان آینه‌های هلیوستات، انتخاب انواع مختلف سیال عامل و تغییر ساختار گیرنده متمرکز بوده و در زمینه تغییر میدان جریان در لوله‌های گیرنده، تحقیقات محدودی صورت گرفته است. بنابراین، برای گیرنده حفره‌ای برج خورشیدی، انجام تحقیقات بیشتر برای یافتن الگوهای مناسب جریان با استفاده از آشوبگرها تحت شرط مرزی شار حرارتی

غیریکنواخت ضروری است.

در این پژوهش، تأثیر استفاده از چهار نوع آشوبگر مختلف بر جریان سیال و انتقال حرارت در لوله گیرنده حفره‌ای برج خورشیدی تحت شار حرارتی غیر یکنواخت مطالعه شده است. به منظور شبیه‌سازی شار خورشیدی غیریکنواخت واقعی بر لوله‌های گیرنده، از روش HFLCAL (Heliostats Field Layout Calculations) استفاده شده است. تأثیر شکل آشوبگرها، موقعیت قرارگیری درون لوله گیرنده و همچنین تأثیر گام و ضخامت این نوع آشوبگرها با سیال عامل نمک مذاب به منظور بهبود عملکرد حرارتی گیرنده حفره‌ای برج خورشیدی برای اولین بار در این پژوهش بررسی شده است.

معادلات حاکم

جریان سیال و انتقال حرارت در لوله گیرنده حفره‌ای با استفاده از نرم افزار انسیس فلوئنت ۱۹/۲ شبیه سازی شده است. سیال درنظر گرفته شده در لوله‌های گیرنده نمک نیترات مذاب (هایتک) است که قدرت ذخیره انرژی بالایی دارد [22]. بر اساس مطالعات گذشته، مدل آشفتگی k-ε با تابع دیواره استاندارد برای پیش‌بینی انتقال حرارت و ضریب اصطکاک نمک‌های مذاب در جریان آشفته درون لوله‌ها مناسب است. معادلات حاکم بر جریان سیال درون لوله گیرنده شامل معادله بقای جرم، مومنتم، انرژی و همچنین مدل استاندارد k-ε به صورت زیر بیان می‌شوند [23]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \qquad (۱)$$

$$\rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \mu_t)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\delta_{ij}\right)\right] \qquad (۲)$$

$$\rho \frac{\partial (u_i h)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[C_p \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t}\right)\frac{\partial T}{\partial x_i}\right] \qquad (۳)$$

$$\frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i} + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \rho\varepsilon \qquad (۴)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} + \frac{\varepsilon c_1}{k}\mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - c_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \qquad (۵)$$

که ویسکوزیته آشفتگی است و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \qquad (۶)$$

در معادلات (۱) تا (۶)، ρ، u، T، P، c_p، μ، h، ε، k، به ترتیب چگالی، سرعت، دما، فشار، ظرفیت گرمایی ویژه، ویسکوزیته سیال،آنتالپی، اتلاف آشفتگی و انرژی جنبشی آشفتگی هستند. در مدل آشفتگی، c_1،c_2،σ_k،σ_ε، وc_μ مقادیر ثابت هستند، c_1 = ۱/۴۴، c_2 = ۱/۹۲، σ_k = ۱/۰، σ_ε = ۱/۳ و c_μ = ۰/۰۹.

خواص ترموفیزیکی نمک نیترات مذاب شامل لزجت، چگالی، ضریب هدایت و ظرفیت گرمایی ویژه، تابعی از دما و بر اساس معادلات (۷) تا (۱۰) و به صورت توابع چند جمله‌ای در نرم افزار تعرف شده‌اند [22].

$$\mu = 0.23816 - 1.2768\mathrm{E}-3T + 2.6275\mathrm{E}-6T^2 - 2.4331\mathrm{E}-9T^3 + 8.507\mathrm{E}-13T^4,\ \mathrm{Pa\,s} \qquad (۷)$$

$$\rho = 2280.22 - 0.733T,\ \mathrm{kg\,m^{-3}} \qquad (۸)$$

$$K = 0.7663 - 6.47\mathrm{E}-4T,\ \mathrm{W(mK)^{-1}} \qquad (۹)$$

$$c_p = 1560,\ \mathrm{J(kgK)^{-1}} \qquad (۱۰)$$

به منظور بررسی جریان سیال و انتقال حرارت در لوله گیرنده حفره‌ای در حضور آشوبگرهای مختلف،پارامترهای عدد رینولدز، عدد ناسلت و ضریب اصطکاک با استفاده از معادلات (۱۱) تا (۱۳) تعریف شده‌اند.

$$Re = \frac{\rho U D_h}{\mu} \qquad (۱۱)$$

$$Nu = \frac{h D_h}{K} \qquad (۱۲)$$

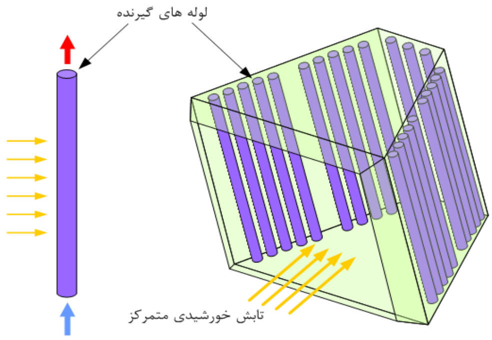
$$f = \frac{\Delta P D_h}{\frac{1}{2}\rho U^2 L} \qquad (۱۳)$$

در معادلات فوق،R_e عدد رینولدز،D_h قطر هیدرولیکی لوله گیرنده (D_h=۴۰mm)، Nu عدد ناسلت،h ضریب انتقال حرارت،f ضریب اصطکاک، ΔP افت فشار در طول لوله و L طول لوله

گیرنده (۸۰۰mm) است.

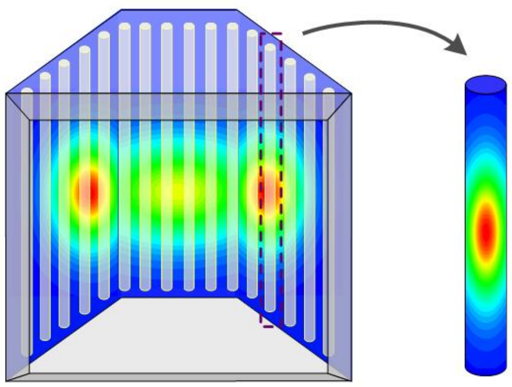
هندسه مسئله

در نیروگاه برج خورشیدی، آینه‌های هلیوستات تابش اشعه خورشیدی کم‌چگال را به سمت گیرنده حفره‌ای مستقر در بالای برج مرکزی منعکس می‌کنند. شکل(۱) شماتیک گیرنده حفره‌ای چندضلعی را نشان می‌دهد. آینه‌های هلیوستات از طریق دریچه شیشه‌ای کوارتز، تابش مستقیم نور خورشید را به سمت لوله‌های گیرنده منعکس کرده و بر روی آن‌ها متمرکز می‌کنند. لوله‌های گیرنده فولادی به دیوارهای داخلی جوش‌شده‌اند.

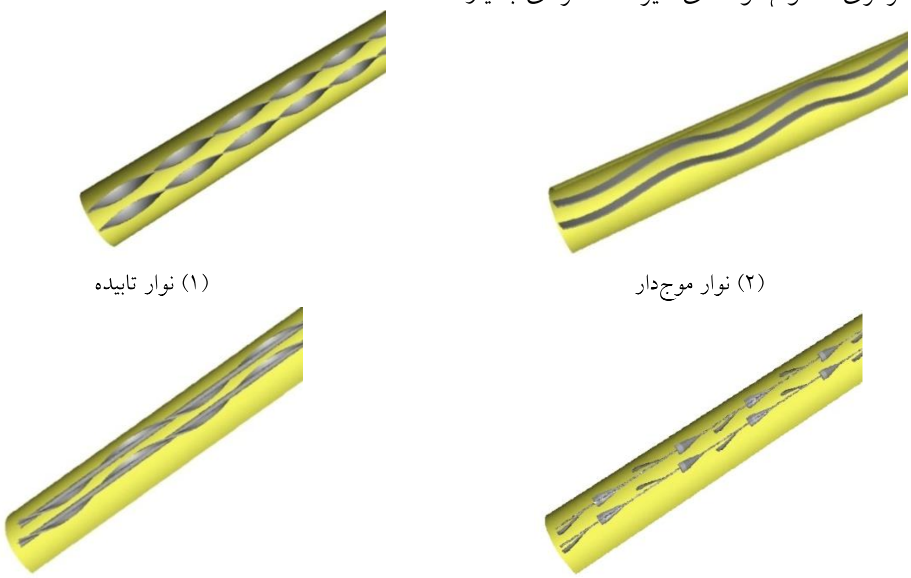


شکل ۱نمودار شماتیک گیرنده حفره‌ای

به دلیل خصوصیت متمرکزکننده آینه‌های هلیوستات، شار حرارتی دربخش مرکزی سطوح لوله‌های گیرنده حفره‌ای بسیار بیشتر و در نتیجه توزیع دما غیریکنواخت خواهد بود. شکل (۲) توزیع شار تشعشعی خورشیدی غیریکنواخت را در یک گیرنده حفره‌ای نشان می‌دهد. به منظور بهبود انتقال حرارت جابجایی درون لوله‌های گیرنده و کاهش توزیع دمای غیر یکنواخت در سطح لوله‌ها، از آشوبگرها استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر، تأثیر استفاده از چهار نوع آشوبگر مختلف در لوله گیرنده برای بهبود انتقال حرارت بررسی شده است: (۱) نوار تابیده، (۲) نوار موج‌دار، (۳) نوار حلزونی و (۴) نوار پره‌دار. هندسه مسئله در نرم‌افزار انسیس فلوئنت تولید و شبکه‌بندی شده است. انواع آشوبگر به کار برده شده در شکل (۳) و ابعاد هندسی آشوبگرها در شکل (۴) نمایش داده شده است.

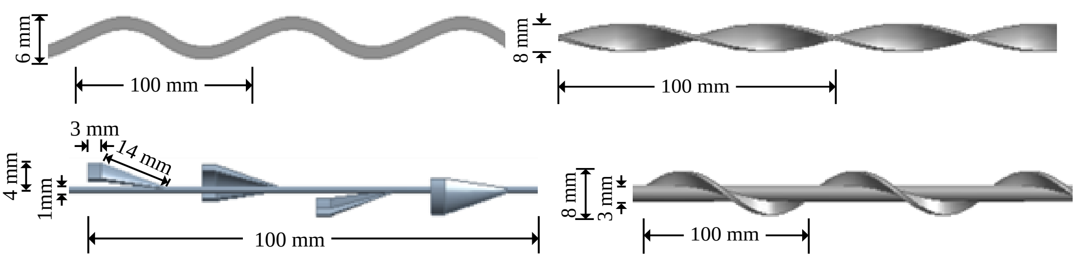


شکل۲ توزیع شار حرارتی غیریکنواخت در گیرنده حفره‌ای



(۱) نوار تابیده
(۲) نوار موج‌دار
(۳) نوار حلزونی
(۴) نوار پره‌دار

شکل۳ انواع آشوبگرهای مورد بررسی در این پژوهش



شکل۴ ابعاد هندسی آشوبگرها

شرایط مرزی

در ورودی لوله سرعت و دما ثابت در نظر گرفته می‌شوند. دمای ورودی ۵۵۰ درجه کلوین و عدد رینولدز از ۸۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ تغییر می‌کند. شرایط مرزی ورودی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$u = v = 0, \; w = constant, \; T = T_{inlet} \qquad (۱۴)$$

فرض کاملاً توسعه‌یافته در خروجی لوله اعمال شده است:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \; \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0 \qquad (۱۵)$$

در دیواره لوله از شرط عدم لغزش و شرط شار حرارتی غیریکنواخت استفاده شده است. بخشی از سطح لوله گیرنده حفره‌ای که در مقابل میدان هلیوستات قرار می‌گیرد نسبت به سطحی که پشت به میدان قرار می‌گیرد، شار حرارتی بیشتری دریافت می‌کند. بنابراین، به منظور شبیه‌سازی و بررسی دقیق‌تر انتقال حرارت در لوله گیرنده، شرط مرزی شار حرارتی غیر یکنواخت واقعی بر دیواره لوله اعمال می‌شود. در این پژوهش برای محاسبه شار حرارتی غیر یکنواخت واقعی از مدل HFLCAL برای تعداد ده هلیوستات استفاده شده است. توزیع شار حرارتی توسط معادله (۱۶) محاسبه می‌شود [24].

$$Flux\,(y,z) = \sum_{i=1}^{10} \frac{P_{h,i}}{2\pi\sigma_{HF,i}^2} e^{-\frac{(y^2+z^2)}{2\sigma_{HF,i}^2}} \qquad (۱۶)$$

که در آن y و z مختصات هلیوستات‌ها، P_h و σ_{HF} به ترتیب توان کلی و انحراف موثر در HFLCAL می‌باشند که با استفاده از معادلات زیر توصیف می‌شوند[24]:

$$P_h = I_D . A_m . \cos w . f_{at} . \tau \qquad (۱۷)$$

$$\sigma_{HF} = \sqrt{D^2(\sigma_{sun}^2 + \sigma_{bq}^2 + \sigma_{ast}^2 + \sigma_t^2} \,/\, \sqrt{\cos rec} \qquad (۱۸)$$

که در آن، A_m، I_D، $\cos w$، f_{at}، τ و D، به ترتیب دامنه کلی آینه‌های هلیوستات (۳۹/۹۱۲۶ مترمربع)، تابش مستقیم خورشیدی ($۱۰۰۰Wm^{-2}$)، کسینوس زاویه تابش نور خورشید در زمان آزمایش، ضریب میرایی در نتیجه کدری اتمسفر، بازتاب‌پذیری موثر هلیوستات‌ها و فاصله تا نقطه هدف هستند.

در معادله (۱۸)، σ_t و به σ_{sun} ترتیب خطای sunshape با انحراف معیار (۰/۰۰۲۵۱ راد) و خطای ردیابی (۰ راد) است. σ_{bq} کیفیت پرتوی مربوط σ_{ast} به خطای شیب آینه است که توسط معادله (۱۹) و (۲۰) محاسبه می‌شوند [24].

$$\sigma_{bq}^2 = (2\sigma_{s-HF})^2 \qquad (۱۹)$$

$$\sigma_{ast} = \frac{\sqrt{0.5(H_t^2 + W_S^2)}}{4D} \qquad (۲۰)$$

که σ_{s-HF}، انحراف خطای شیب آینه است که در جدول (۱) آورده شده است. همچنین، H_t و W_s به ترتیب ابعاد تصویر در صفحات مماسی و طولی در فاصله D از آینه هستند که با استفاده از معادله (۲۱) محاسبه می‌شوند [24].

$$H_t = d\left|\frac{D}{f} - \cos w\right|, \quad w_s = d\left|\frac{D}{f}\cos w - 1\right| \qquad (۲۱)$$

در معادله فوق f فاصله کانونی و d ابعاد کلی آینه‌ها است، که برابر با جذر کل مساحت هلیوستات در نظر گرفته شده است. در معادله (۱۸)، $\cos rec$ کسینوس پرتوی مرکزی بازتاب‌شده از هلیوستات بر روی سطح گیرنده است که توسط معادله (۲۲) محاسبه می‌شود[24].

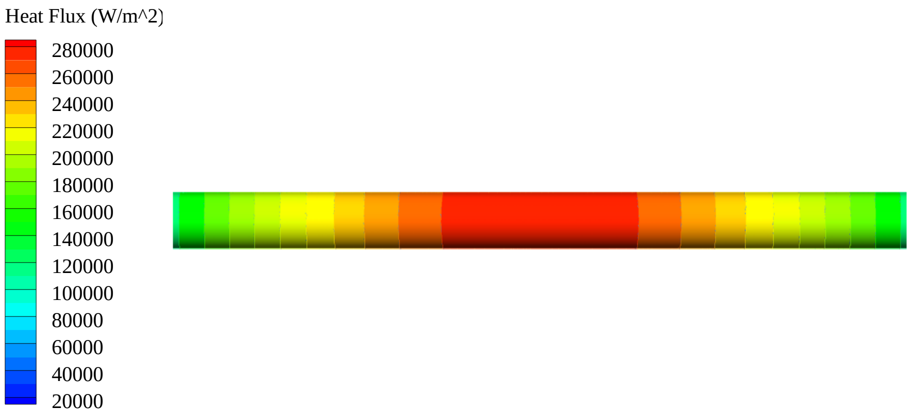
$$\cos rec = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{D} \qquad (۲۲)$$

مختصات x،y و z هلیوستات‌ها، فاصله تا نقطه هدفِ D، فاصله کانونی f، زاویه تابش اشعه‌های خورشید بر روی هلیوستات‌ها، $\cos w$، و عملکرد نوری در جدول (۱) آورده شده است.

شار حرارتی غیر یکنواخت در مطالعه حاضر با نوشتن کد مخصوص به زبان سی پلاس پلاس به نرم‌افزار اضافه شده است. توزیع شار حرارتی غیر یکنواخت بر روی سطح لوله گیرنده در شکل (۵) نمایش داده شده است.

جدول ۱ پارامترهای میدان هلیوستات [25]

HFCALσ_{slope}/mrad	UNIZARσ_{slope}/mrad	cosw	Time (UT)	f/m	D/m	z/m	y/m	x/m	ردیف
۱/۰	۰/۸	۰/۸۱۸۸	۱۲:۵۳:۳۵	۱۶۶/۷	۱۶۵/۳۲	۶/۲۳	۱۵۵/۴۴	−۵۰/۶۰	۱
۱/۲۲	۱/۱۹	۰/۸۴۷۷	۱۱:۴۳:۲۱	۱۶۶/۶	۱۶۵/۲۳	۶/۰۶	۱۵۰/۲۶	−۶۴/۰۲	۲
۱/۰	۰/۶	۰/۸۲۵۳	۱۲:۵۴:۰۰	۱۴۱/۵	۱۳۹/۷۹	۵/۷۲	۱۲۸/۶۳	−۴۸/۱۶	۳
۱/۲۴	۱/۱۴	۰/۸۵۱۰	۱۱:۵۶:۰۶	۱۴۱/۳	۱۳۹/۶۷	۶/۱۵	۱۳۷/۳۶	۰/۰۱	۴
۱/۱۲	۰/۷۸	۰/۸۳۲۷	۱۳:۰۲:۲۵	۱۳۰/۴	۱۲۸/۵۸	۵/۶۵	۱۲۱/۳۱	−۳۳/۵۳	۵
۰/۹۶	۰/۵۲	۰/۸۴۲۱	۱۲:۰۸:۲۶	۱۳۰/۸	۱۲۸/۸۷	۵/۸۳	۱۰۲/۲۶	۷۳/۷۷	۶
۱/۴۴	۱/۳۸	۰/۸۹۲۲	۱۱:۱۷:۴۷	۱۰۲/۷	۱۰۰/۰۵	۴/۵۱	۷۲/۳۶	−۶۲/۷۷	۷
۱/۲۱	۰/۹۷	۰/۸۷۴	۱۱:۵۵:۴۲	۱۰۲/۴	۹۹/۸۳	۴/۷۹	۸۲/۳۰	−۴۸/۹۱	۸
۱/۶	۲/۱	۰/۹۴۸۴	۱۱:۳۷:۲۲	۵۷/۰	۵۱/۹	۴/۱	۳۷/۸	−۱۸/۸۹	۹
۱/۶۸	۲/۱۵	۰/۹۵۱۳	۱۲:۳۲:۲۵	۵۷/۰	۵۱/۸	۴/۲۷	۴۱/۱۵	۹/۷۵	۱۰



شکل ۵ توزیع شار حرارتی غیر یکنواخت بر روی سطح لوله گیرنده

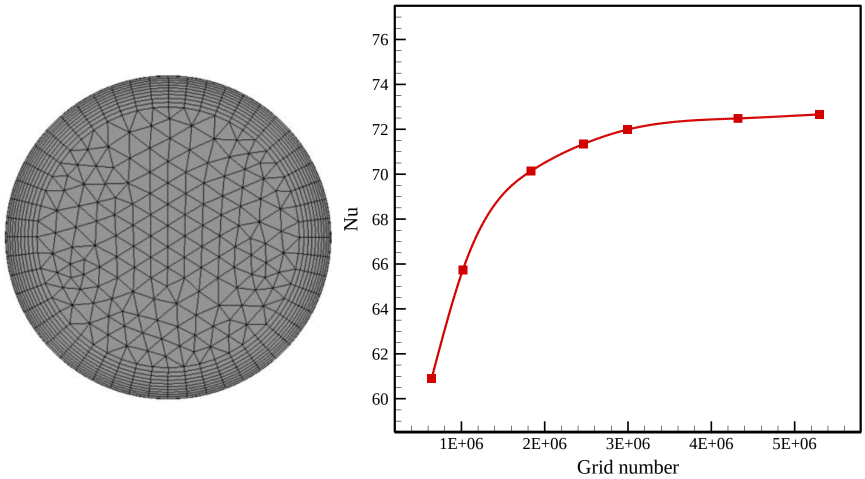
معادلات حاکم بر مسئله بر اساس روش حجم محدود حل‌شده‌اند. مدل استاندارد $\kappa-\varepsilon$ با تابع دیواره‌ی استاندارد، که می‌تواند انتقال حرارت و اصطکاک نمک‌های مذاب در لوله جریان آشفته را به خوبی پیش‌بینی کند، در مدل حاضر انتخاب شده است[22]. برای کوپل فشار و سرعت از الگوریتم سیمپل و برای گسسته‌سازی جملات جابجایی در معادلات مومنتوم و انرژی از روش بالاست مرتبه دوم استفاده شده است.

مطالعه شبکه و اعتبارسنجی

در این بخش، استقلال حل عددی از اندازه شبکه محاسباتی و همچنین صحت سنجی آن بررسی شده است. به منظور بررسی استقلال حل از شبکه، عدد ناسلت برای هفت شبکه مختلف محاسبه شده است. عدد ناسلت محاسبه شده مربوط به حالتلوله گیرنده بدون آشوبگر و سیال آب است که جهت اعتبارسنجی استفاده شده است[26]. عدد رینولدز در این حالت ۱۰۰۰۰، دمای ورودی ۳۰۰ درجه کلوین، قطر داخلی لوله ۱۶/۶، طول لوله ۲۰۰۰ میلی‌متر و شار حرارتی ثابت و برابر با ۸۷۵۷۱ وات بر مترمربع درنظر گرفته شده است. شکل (۶) تغییرات عدد ناسلت را بر حسب تعداد سلول‌های شبکه نشان می‌دهد.

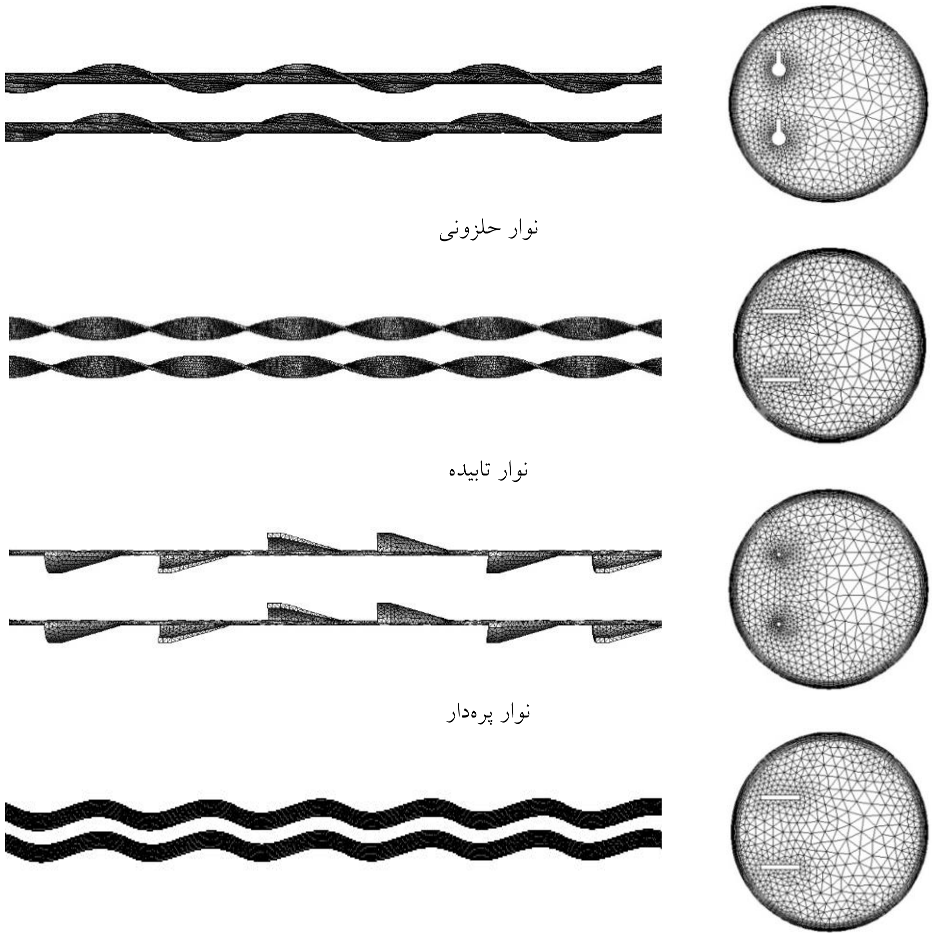
با توجه به شکل (۶–الف)، از شبکه ششم به بعد تغییر چندانی در عدد ناسلت مشاهده نمی‌شود. بنابراین شبکه ۵ با تعداد ۴۳۲۰۱۱۹ سلول انتخاب شده است. شکل (۶–ب) شبکه تولید شده در مقطع لوله را نشان می‌دهد.

برای سایر حالت‌های مورد مطالعه در این پژوهش، بررسی استقلال از شبکه به طریق مشابه انجام شده است. شبکه محاسباتی تولید شده برای چهار نوع آشوبگر در شکل (۷) نمایش داده شده است.



(ب) (الف)

شکل ۶(الف) عدد ناسلت در شبکه‌های محاسباتی مختلف، (ب) شبکه تولید شده در سطح مقطع لوله



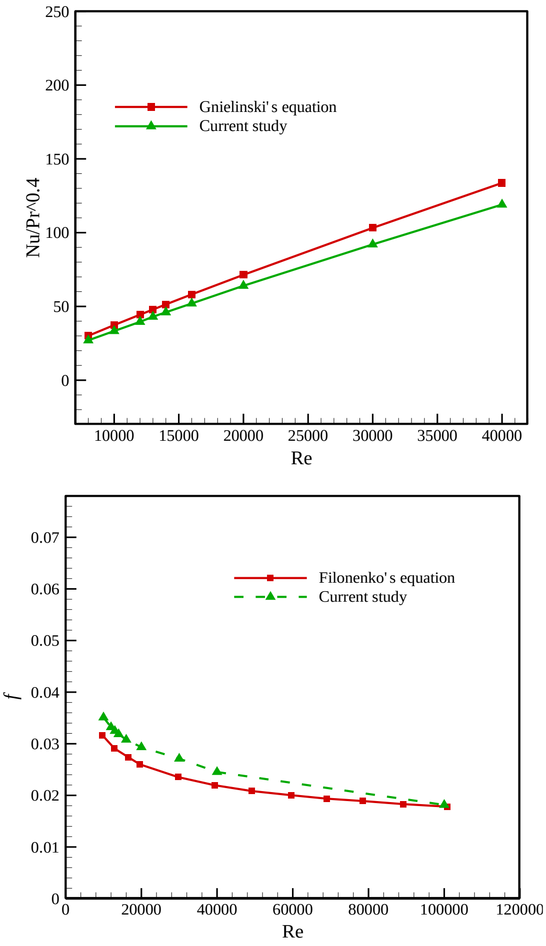
شکل ۷شبکه محاسباتی تولید شده برای چهار نوع آشوبگر

برای صحت سنجی عددی دو حالت در نظرگرفته شده است. در حالت اول لوله گیرنده بدون آشوبگر با سیال آب، و در حالت دوم لوله گیرنده با سیال نمک مذاب در نظر گرفته شده است. در حالت اول اعتبارسنجی عدد ناسلت با رابطه گنیلینسکیو و ضریب اصطکاک با رابطه فیلونکو انجام شده است که به ترتیب توسط معادله (۲۳) و (۲۴) تعریف می‌شوند [26].

$$Nu = 0.012(\mathrm{Re}^{0.87} - 280)\,\mathrm{Pr}^{0.4}[1+(\frac{D}{l})^{\frac{2}{3}}] \qquad (۲۳)$$

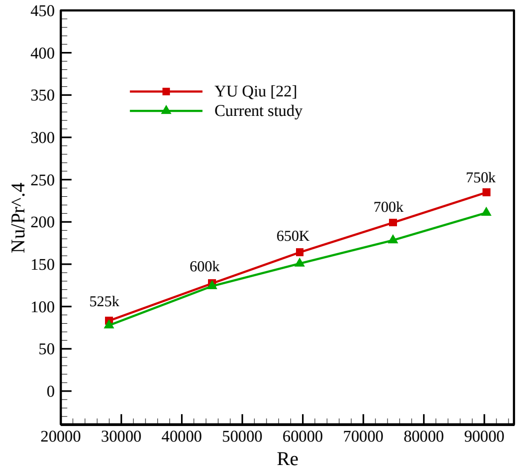
$$f = (1.821\times \log Re - 1.864)^{-2} \qquad (۲۴)$$

در شکل (۸) نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در اعداد رینولدز مختلف با مقادیر محاسبه شده از رابطه گنیلینسکی و رابطه فیلوننکو مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی مطابقت خوبی با رابطه‌های فوق دارد. اختلاف بین عدد ناسلت حاصل از شبیه‌سازی و رابطه گنیلینسکی و همچنین اختلاف ضریب اصطکاک بدست آمده و رابطه فیلوننکو به طور میانگین ۶ درصد برای هر دو نمودار است.



شکل ۸مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی با رابطه گنیلینسکی و فیلوننکو

اعتبارسنجی حالت دوم با در نظر گرفتن سیال نمک مذاب درون لوله با قطر ۱۶/۶میلی‌متر، طول ۲۰۰۰ میلی‌متر، شار حرارتی ثابت ۸۷۵۷۱W/m^2 و سرعت ورودی ۴m/s است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج پژوهش کیو و همکاران [22] مقایسه شده است. مقایسه نتایج پژوهش حاضر با کار عددی کیو و همکاران در شکل (۹) نمایش داده شده است. درصد اختلاف در نمودار اعتبار سنجی عدد ناسلت به طور میانگین ٪۷ است.



شکل ۹مقایسه نتایج پژوهش حاضر با کار عددی کیو و همکاران [22]

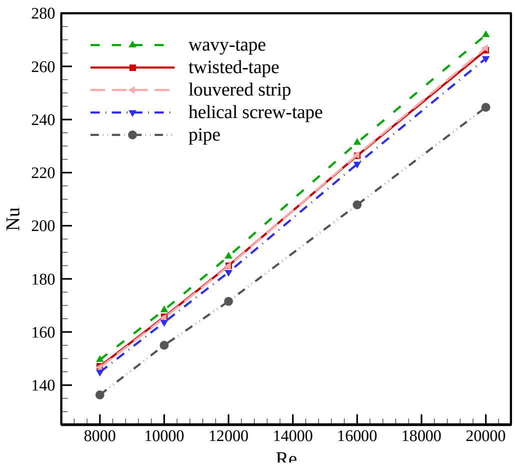
نتایج

در این بخش نتایج بدست آمده از حل عددی جریان سیال در لوله گیرنده تحت شار حرارتی غیر یکنواخت و در حضور آشوبگرهای مختلف ارائه شده است. اثر تغییر پارامترهای هندسی شامل گام و ضخامت آشوبگر، تغییر موقعیت قرارگیری آشوبگر درون لوله گیرنده و همچنین تأثیر شکل آشوبگر بر پارامترهای جریان بررسی شده است.

بررسی تأثیر شکل آشوبگر

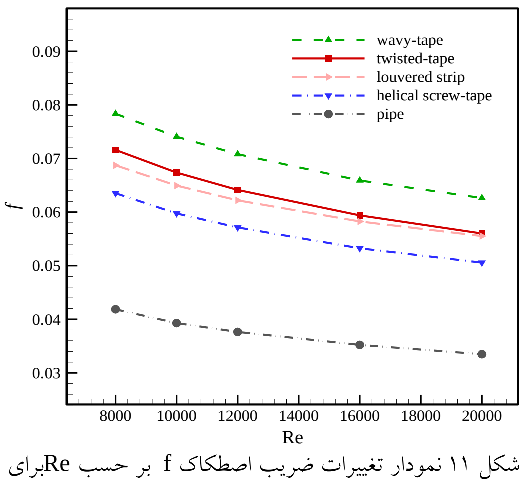
در این بخش تأثیر شکل آشوبگرها بر جریان سیال و انتقال حرارت در لوله گیرنده بررسی شده است. شکل آشوبگر نقش مهمی در میزان نوسانات و آشفتگی جریان و کارایی انتقال حرارت لوله گیرنده خواهد داشت. شکل (۱۰) تغییراتNuرا در اعداد رینولدز مختلف برای چهار نوع آشوبگر نوار تابیده، نوار موج‌دار، نوار حلزونی و نوار پره‌دار نشان می‌دهد. با توجه به نمودار، عدد ناسلت در عدد رینولدز ۸۰۰۰ برای چهار نوع آشوبگر نوار موج‌دار، نوار تابیده، نوار پره‌دار و نوار حلزونی به ترتیب دارای مقادیر ۱۵۰، ۱۴۷، ۱۴۶ و ۱۴۴ است. بنابراین نوار موج‌دار نسبت به سه نوع آشوبگر دیگر، عدد ناسلت بالاتری دارد. در مقابل، نوار حلزونی کمترین عدد ناسلت را نتیجه داده است. همچنین، آشوبگر نوار موج‌دار نسبت به لوله ساده عدد ناسلت را ۱۰ درصد افزایش داده است. تولید گردابه‌های مماسی در کناره-های نوار موجدار باعث افزایش انتقال حرارت موضعی در سطح لوله در محل اعمال بیشترین شار حرارتی می‌شود که در نتیجه

آن، اختلاط جریان سیال گرم کنار دیواره با جریان سرد بهتر صورت گرفته و گرادیان دمای محیطی کاهش بیشتری خواهد داشت.



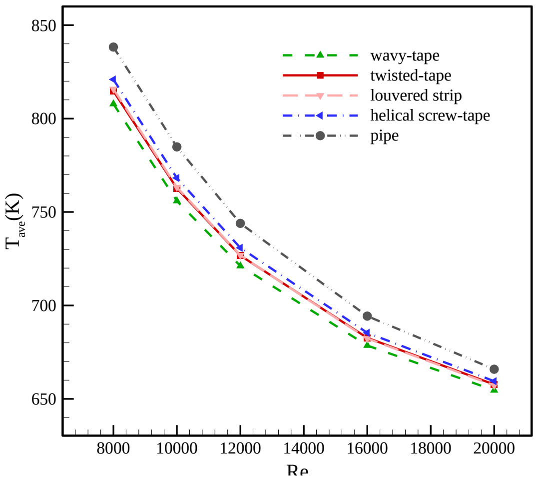
شکل ۱۰ نمودار تغییرات Nu بر حسب عدد Re برای آشوبگرهای مختلف

تغییرات ضریب اصطکاک در اعداد رینولدز مختلف برای چهار نوع آشوبگر و لوله ساده در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود استفاده از آشوبگرها به دلیل افزایش قابل توجه مقاومت در جریان، منجر به افزایش ضریب اصطکاک شده است. مقایسه ضریب اصطکاک برای چهار نوع آشوبگر نشان می‌دهد نوار موجدار بیشترین ضریب اصطکاک و نوار حلزونی کمترین ضریب اصطکاک را دارد که در عدد رینولدز ۸۰۰۰، به ترتیب دارای مقادیر ۰/۰۷۸ و ۰/۰۶۳ هستند.



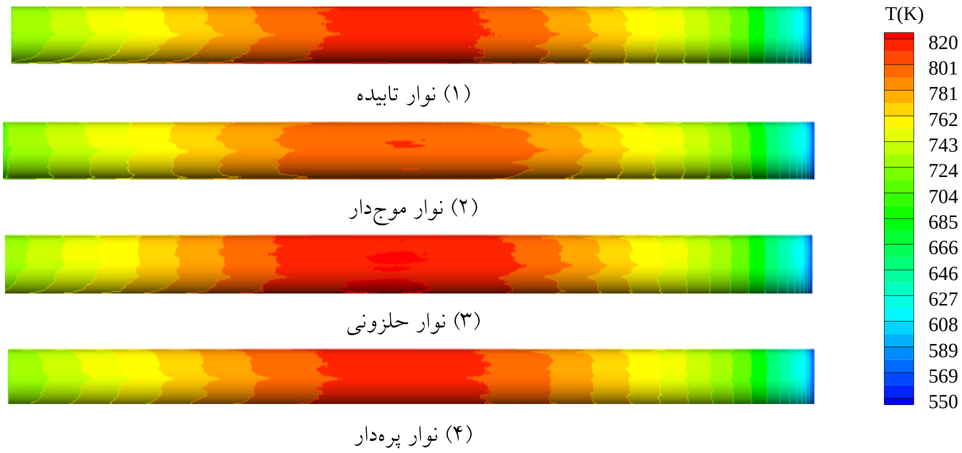
شکل ۱۱ نمودار تغییرات ضریب اصطکاک f بر حسب Re برای آشوبگرهای مختلف

در شکل (۱۲) تغییرات دمای میانگین سطح بیرونی لوله گیرنده بر حسب *Re* برای چهار نوع آشوبگر نشان داده شده و با لوله ساده بدون آشوبگر مقایسه شده است. همان‌طور که اشاره شد، افزایش گرادیان دمای محیطی باعث افزایش تنش حرارتی و کاهش عمر و قابلیت اطمینان لوله‌های گیرنده می‌شود. با توجه به نمودار شکل (۱۲)، نوار موجدار کمترین دمای میانگین T_{avg} (۸۰۷ درجه کلوین در عدد رینولدز ۸۰۰۰) را نسبت به سه نوع دیگر دارد. در مقابل، نوار حلزونی بیشترین دمای میانگین را در بین چهار نوع آشوبگر دارد که مقدار آن در عدد رینولدز ۸۰۰۰ برابر با ۸۲۱ درجه کلوین است. دمای میانگین لوله با نوار موجدار در عدد رینولدز ۸۰۰۰ نسبت به لوله ساده بدون آشوبگر، چهار درصد کاهش یافته است.نوار موجدار با تولید گردابه‌های متمرکز در کناره‌های خود باعثافزایش انتقال حرارت در محل تمرکز شار خورشیدی و در نتیجه کاهش دمای میانگین سطح لوله می‌شود.



شکل۱۲ تغییرات دمای میانگین سطح بیرونی لوله برای آشوبگرهای مختلف

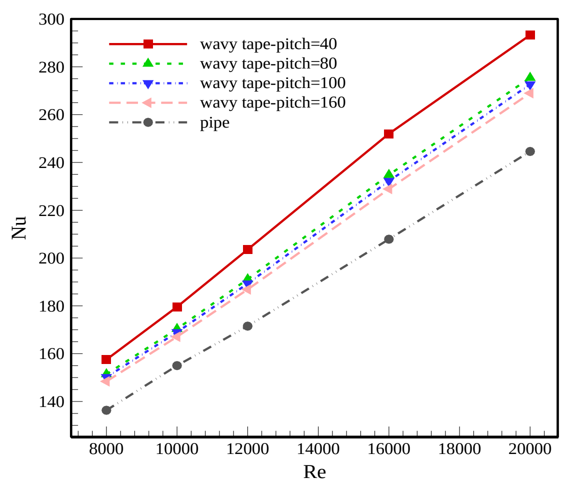
در شـــکل (۱۳) کانتور دما روی ســـطح لوله گیرنده برای شکل‌های مختلف آ شوبگر نشان داده شده ا ست. همان‌طور که م شاهده می شود، نوار موج‌دار دارای کمترین ناحیه ماکزیمم دما و سپس نوار تابیده و نوار پره‌دار تقریباً دارای توزیع دمای مشابه هســـتند. نوار حلزونی نیز ناحیه ماکزیمم دمای بزرگتری دارد. بنابراین شکل آشوبگرها تأثیر قابل توجهی بر توزیع دمای سطح لوله گیرنده تحت شار حرارتی غیر یکنواخت دارد.



شکل ۱۳ توزیع دما در سطح لوله گیرنده برای آشوبگرهای مختلف

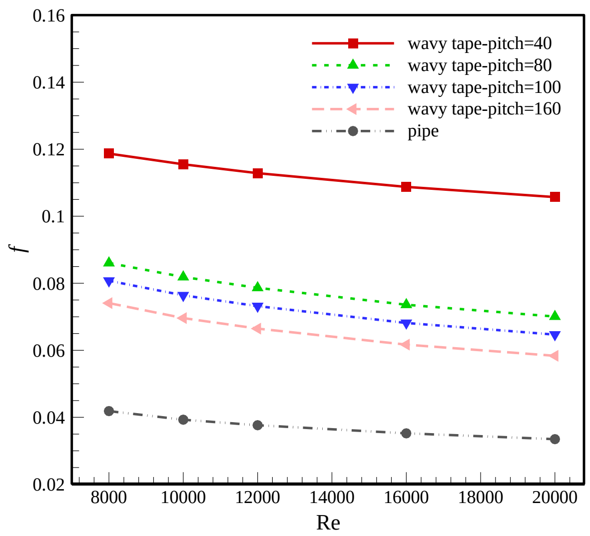
بررسی تأثیر گام آشوبگر

به منظور بررسی اثر تغییر گام آشوبگر بر جریان سیال و انتقال حرارت در لوله گیرنده، چهار گام ۴۰،۸۰ ،۱۰۰و ۱۶۰ میلی‌متر برای نوار موجدار با سطح مقطع $8\times3\,mm^2$ در نظر گرفته شده است. شکل (۱۴) تغییرات عدد ناسلت Nu با عدد رینولدز Re را برای گام‌های مختلف آشوبگر نشان می‌دهد. با افزایش گام آشوبگر در یک عددرینولدز ثابت، عدد ناسلت کاهش می‌یابد. با افزایش گام نوار موجدار و کاهش اغتشاش در جریان، ضخامت لایه مرزی کنار دیواره بزرگتر شده و گرادیان دما کاهش می‌یابد و همین امر باعث کاهش عدد ناسلت شده است.همان طور که مشاهده می‌شود با کاهش گام در یک عدد رینولدز ثابت از ۱۶۰ تا ۴۰ میلی‌متر، عدد ناسلت بیش از ۸ درصد افزایش می‌یابد و گام ۴۰ نسبت به لوله ساده بدون آشوبگر، ۱۸ درصد افزایش عدد ناسلت دارد.



شکل ۱۴ نمودار تأثیر گام نوار موجدار بر عدد ناسلت

شکل (۱۵) تغییرات ضریب اصطکاکf را بر حسب گام آشوبگر در اعداد رینولدز مختلف نشان می‌دهد. با کاهش گام در یک عدد رینولدز ثابت از ۱۶۰ تا ۴۰ میلی‌متر، ضریب اصطکاک به طور میانگین ۷۰ درصد افزایش می‌یابد و گام ۴۰ نسبت به لوله ساده بدون آشوبگر در حدود ۱۹۰ درصد افزایش ضریب اصطکاک دارد.

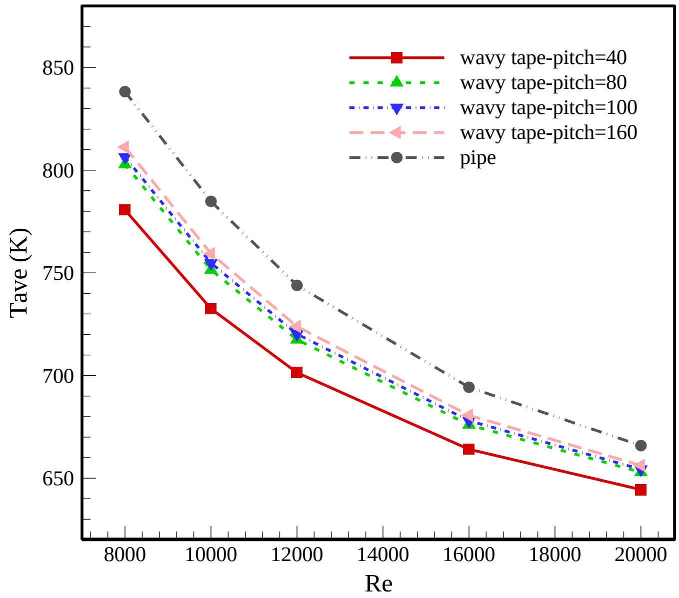


شکل۱۵ نمودار تأثیر گام نوار موجدار بر ضریب اصطکاک

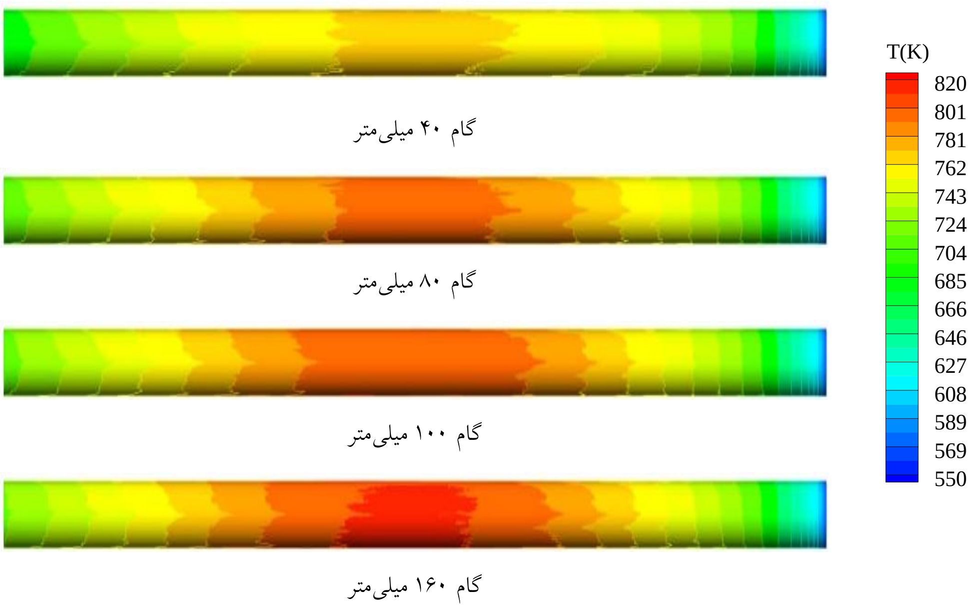
در شکل (۱۶)نمودار تأثیر گام نوار موجدار بر دمای میانگین سطح بیرونی لوله گیرنده به نمایش درآمده است.با کاهش گام، آشفتگی جریان و برخورد سیال با سطح بیشتر شده و دمای میانگین سطح کاهش می‌یابد. دمای میانگین سطح بیرونی لوله گیرنده در عدد رینولدز ۸۰۰۰ برای نوار موجدار با گام ۴۰

میلی‌متر ۷۸۰ درجه کلوین و در گام ۱۶۰ میلی‌متر دارای مقدار ۸۱۱ درجه کلوین است (۳۱ درجه کلوین کاهش دما). همچنین، دمای میانگین سطح برای نوار موج‌دار با گام ۴۰ میلی‌متر نسبت به لوله ساده بدون آشوبگر ۸ درصد کاهش یافته است.

در شکل(۱۷) توزیع دما در سطح لوله گیرنده برای گام‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به کانتورهای دما مشاهده می‌شـــود با افزایش گام‌ها از ۴۰ تا ۱۶۰ میلی‌متر، میزان دمای ماکزیمم روی سطح لوله افزایش می‌یابد. با افزایش گام آشوبگر، میزان انتقال حرارت جابه‌جایی کاهش یافته و دمای ماکزیمم بر روی سطح افزایش می‌یابد و در نتیجه تنش حرارتی نیز افزایش خواهد یافت.



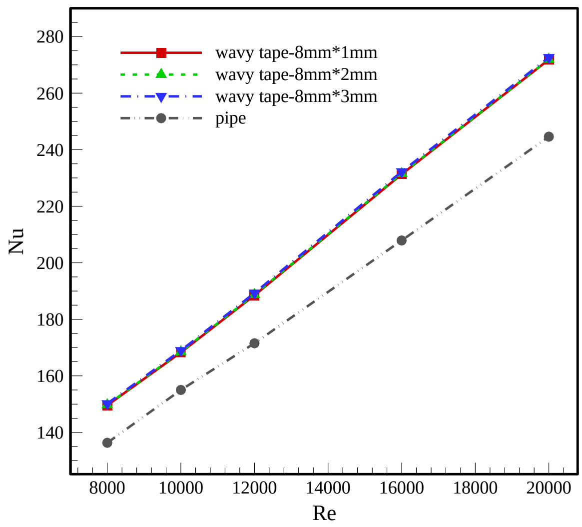
شکل ۱۶ نمودار تأثیر گامبر دمای میانگین سطح بیرونی لوله



شکل ۱۷ توزیع دما در سطح لوله گیرنده برای گام‌های مختلف نوار موج‌دار

بررسی تأثیر ضخامت آشوبگر

در این بخش اثر ضخامت آشوبگر بر جریان سیال و انتقال حرارت در لوله گیرنده بررسی شده است. در لوله گیرندهاز آشوبگر نوار موجدار با گام ۱۰۰ میلی‌متر و با سطح مقطع mm^2 ۱×۸، ۲×۸ و ۳×۸ استفاده شده است. شکل (۱۸) نمودار تأثیر افزایش ضخامت آشوبگر برعدد ناسلت در اعداد رینولدز مختلف را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود عدد ناسلت با افزایش *Re* افزایش یافته و با افزایش ضخامت از ۱ تا ۳ میلی‌متر،افزایش عدد ناسلت برای این نوع آشوبگرنامحسوس است.

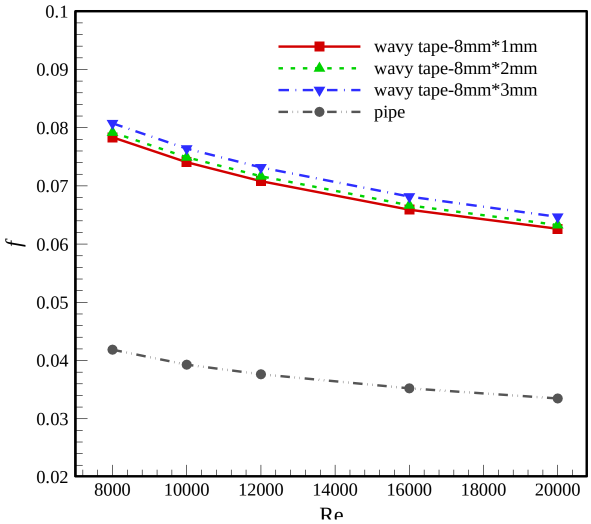


شکل ۱۸ نمودار تغییرات عدد Nu بر حسب عدد Re برای ضخامت‌های مختلف نوار موجدار

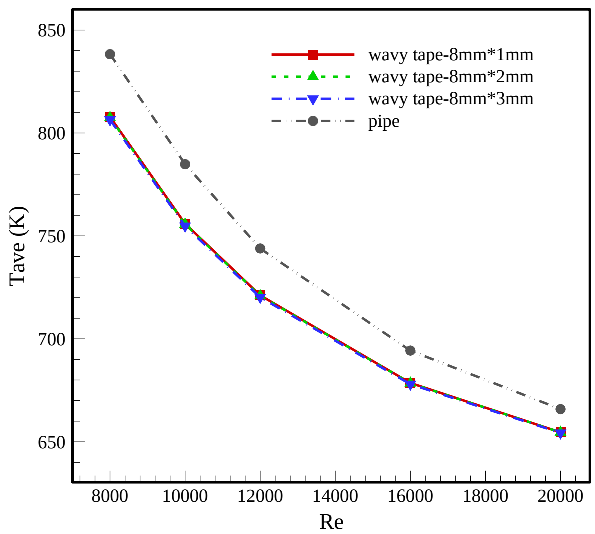
در شکل (۱۹) تأثیر ضخامت نوار موجدار بر ضریب اصطکاک در اعداد رینولدز مختلف نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت آشوبگر از ۱ تا ۳ میلی‌متر، ضریب اصطکاک حدود ۴ درصد افزایش یافته است و ضخامت ۳ میلی‌متر نسبت به لوله ساده بدون آشوبگر منجر به ۹۰ درصد افزایش ضریب اصطکاک شده است.

شکل (۲۰) تغییرات دمای متوسط سطح بیرونی لوله گیرنده را با Re برای ضخامت‌های مختلف نوار موجدار نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش ضخامت نوار موجدار تأثیر محسوسی بر دمای میانگین سطح ندارد. دمای میانگین سطح بیرونی لوله گیرنده برای آشوبگر با ضخامت ۳ میلی‌متر نسبت به لوله ساده بدون آشوبگر، حدود ۴ درصد کاهش یافته است.

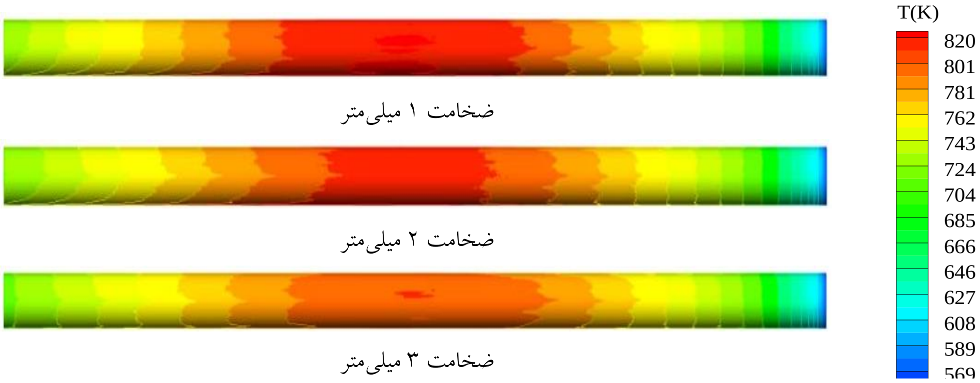
در شکل(۲۱) کانتور دما روی سطح لوله گیرنده برای ضخامت‌های مختلف آشوبگر نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت نوار موجدار، نواحی دارای ماکزیمم دما کوچکتر خواهند شد. کاهش گرادیان دمای محیطی باعث کاهش تنش حرارتی و افزایش قابلیت اطمینان لوله‌های گیرنده می‌شود.



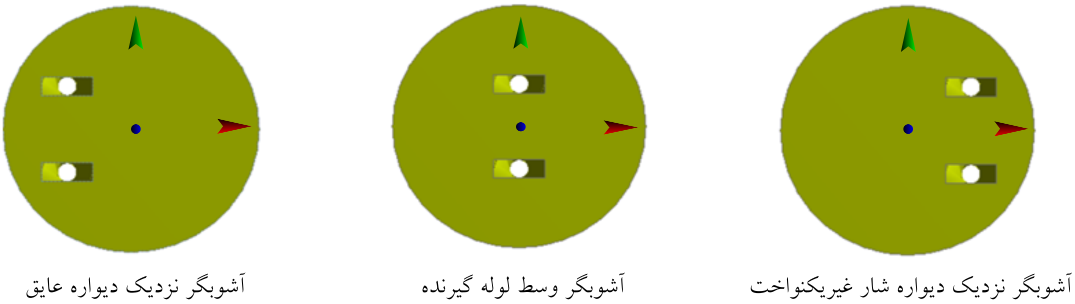
شکل ۱۹ نمودار تغییرات ضریب اصطکاک f بر حسب عدد Re برای ضخامت‌های مختلف نوار موجدار



شکل ۲۰ نمودار تغییرات دمای میانگین سطح بیرونی لوله گیرنده در ضخامت‌های.مختلف نوار موجدار



شکل ۲۱ کانتور دما در سطح لوله گیرنده برای ضخامت‌های مختلف نوار موجدار

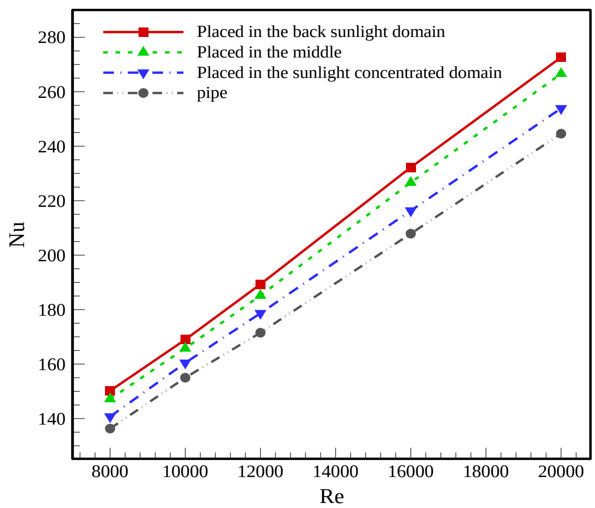


شکل ۲۲ موقعیت‌های مختلف قرارگیری آشوبگر در لوله گیرنده

بررسی موقعیت آشوبگر در لوله گیرنده

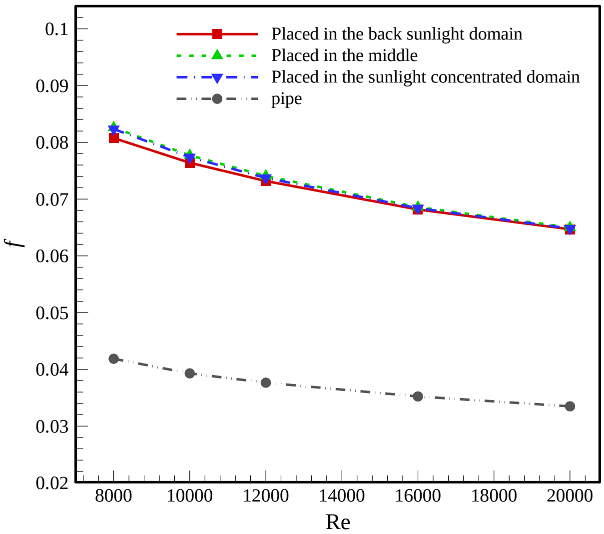
به منظور بررسی تأثیر موقعیت آشوبگر در لوله گیرنده بر جریان سیال و انتقال حرارت، ۳ حالت مختلف برای نوار موجدار با سطح مقطع ۳×۸ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه شار حرارتی غیریکنواخت بر بخشی از سطح لوله گیرنده که در مقابل میدان هلیوستات قرار می‌گیرد وارد می‌شود، سه حالت برای موقعیت قرارگیری آشوبگر در لوله گیرنده می‌توان در نظر گرفت: ۱. نزدیک به دیواره شار حرارتی غیریکنواخت، ۲. وسط لوله گیرنده، ۳. نزدیک به دیواره عایق. در شکل (۲۲) موقعیت‌های مختلف قرارگیری آشوبگر در ۳ حالت، به نمایش درآمده است.

شکل (۲۳) تأثیر موقعیت قرارگیری آشوبگر در لوله گیرنده را بر عدد ناسلت نشان می‌دهد.مشاهده می‌شود که عدد ناسلت Nu برای حالتی که آشوبگر در موقعیت نزدیک به دیواره عایق قرار گرفته است، بیشتر از موقعیت نزدیک به دیواره شار حرارتی غیریکنواخت است. وقتی آشوبگر در موقعیت نزدیک به دیواره عایق قرار می‌گیرد، جریان سیال گرم بیشتری از ناحیه نزدیک به دیواره با شار حرارتی غیریکنواخت به ناحیه نزدیک به دیواره عایق انتقال یافته و اختلاط جریان سیال سرد و گرم به طور کامل صورت می‌گیرد و در نتیجه انتقال حرارت بهتر انجام می‌شود.در عدد رینولدز ۸۰۰۰، عدد ناسلت برای موقعیت آشوبگر در مجاورت دیواره عایق ۱۵۰ و در موقعیت نزدیک به دیواره با شار حرارتی غیریکنواخت ۱۳۶ محاسبه شده است.



شکل ۲۳نمودار تغییرات عدد Nu بر حسب عدد Re برای موقعیت‌های مختلف آشوبگر

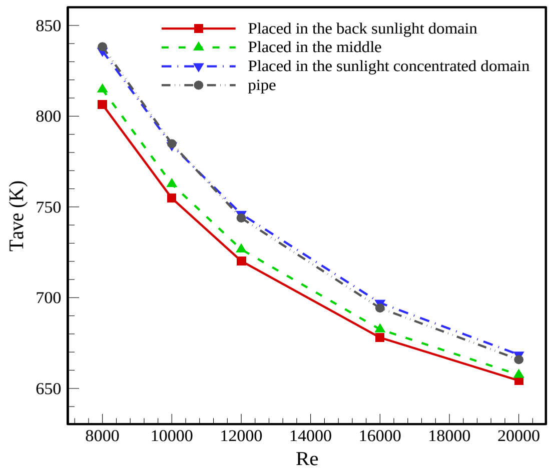
تغییرات ضریب اصطکاک f بر حسب عدد رینولدز برای موقعیت‌های مختلف آشوبگر در لوله گیرنده در شکل (۲۴) نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با تغییر موقعیت از حالت نزدیک به دیواره شار غیریکنواخت به حالت نزدیک به دیواره عایق، تغییر چندانی در ضریب اصطکاک ایجاد نمی‌شود. بنابراین، موقعیت قرارگیری آشوبگر در لوله گیرنده تأثیر محسوسی بر ضریب اصطکاک ندارد.



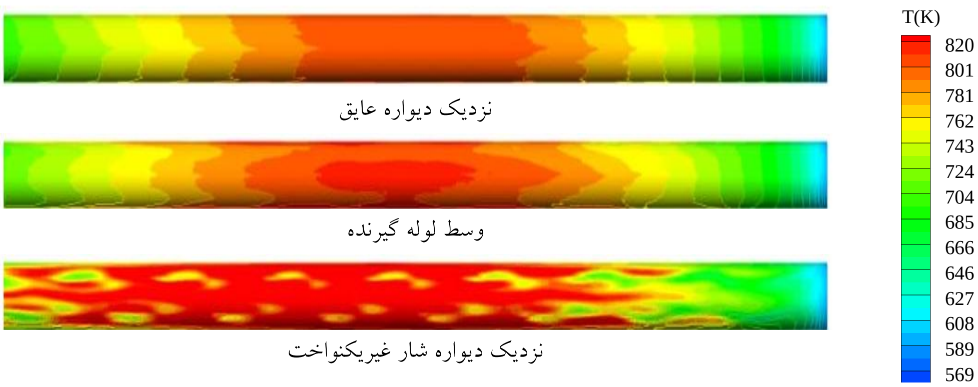
شکل ۲۴ نمودار تغییرات ضریب اصطکاک f بر حسب عدد Re برای موقعیت‌های مختلف آشوبگر

شکل (۲۵) تغییرات دمای میانگین T_{avg} سطح بیرونی لوله گیرنده را بر حسب عدد رینولدز برای موقعیت‌های مختلف آشوبگر نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با تغییر موقعیت آشوبگر از دیواره شار حرارتی غیریکنواخت به دیواره عایق، T_{avg} کاهش یافته است. در عدد رینولدز ۸۰۰۰، T_{avg} برای آشوبگر در موقعیت نزدیک به دیواره عایق، ۸۰۶ درجه کلوین و برای آشوبگر در موقعیت نزدیک به دیواره شار غیریکنواخت، ۸۳۶ درجه کلوین است.

توزیع دما در سطح لوله گیرنده برای سه موقعیت قرارگیری آشوبگر در شکل (۲۶) نمایش داده شده است. با تغییر موقعیت آشوبگر و نزدیک شدن به ناحیه شار غیریکنواخت، دمای ماکزیمم بر روی سطح افزایش یافته است. درحالی‌که در موقعیت نزدیک به دیواره عایق، توزیع دما یکنواخت‌تر است. وقتی آشوبگر نزدیک به دیواره با شار غیریکنواخت قرار می‌گیرد، اختلاط جریان سیال گرم نزدیک به دیواره بیشتر با بخش میانی لوله صورت می‌گیرد و بنابراین اختلاط جریان سیال گرم و سرد به خوبی صورت نگرفته و توزیع دما غیریکنواخت‌تر خواهد بود. بنابراین، بهترین حالت برای قرارگیری آشوبگر، موقعیت نزدیک به دیواره عایق است.



شکل ۲۵ نمودار تأثیر موقعیت آشوبگر بر دمای میانگین سطح بیرونی لوله گیرنده



شکل ۲۶ کانتور دما در سطح لوله گیرنده برای موقعیت‌های مختلف قرارگیری آشوبگر

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، انتقال حرارت جابجایی نمک نیترات مذاب (هایتک) در لوله گیرنده حفره‌ای تحت شار حرارتی غیریکنواخت به صورت سه بعدی شبیه‌سازی شده است. به منظور بهبود انتقال حرارت و کاهش گرادیان دما بر روی سطح لوله گیرنده، چهار نوع آشوبگر مختلف درنظر گرفته شده است و تأثیر شکل آشوبگرها، ضخامت، گام و موقعیت قرارگیری درون لوله گیرنده مورد مطالعه قرار گرفته است. شار حرارتی غیریکنواخت واقعی بر اساس مدل HFLCAL و با نوشتن کد مخصوص به زبان سی پلاس پلاس به نرم افزار اضافه شده است. نتایج حاصل از انجام این پژوهش به شرح زیر است:

۱. نوار موج‌دار نسبت به سه نوع آشوبگر دیگر، بالاترین ناسلت Nu و کمترین دمای میانگین سطح بیرونی لوله گیرنده را دارد که به ترتیب دارای مقادیر ۱۵۰ و ۸۰۷ درجه کلوین در عدد رینولدز ۸۰۰۰ هستند.افزایش عدد ناسلت نوار موج‌دار نسبت به نوار پره‌دار، تابیده و حلزونی به ترتیب ٪۱/۸، ٪۲ و ٪۳/۲ و نسبت به لوله گیرنده بدون آشوبگر ٪۱۰ است.

۲. با افزایش گام آشوبگر، عدد ناسلت Nu کاهش یافته و دمای میانگین سطح بیرونی لوله گیرنده افزایش می‌یابد. در عدد رینولدز ۸۰۰۰، با افزایش گام از ۴۰ تا ۱۶۰ میلی‌متر، T_{avg} از ۷۸۰ درجه کلوین تا ۸۱۱ درجه کلوین افزایش یافته و عدد Nu ٪۶ کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش گام در یک عدد رینولدز ثابت از ۴۰ تا ۱۶۰، ضریب اصطکاک f به طور متوسط ۷۰ درصد کاهش یافته است.

۳. تحت شار حرارتی مرزی غیریکنواخت، بهترین حالت برای قرارگیری آشوبگر، موقعیت نزدیک به دیواره عایق می‌باشد. توزیع دما در حالتی که آشوبگر در موقعیت نزدیک به دیواره عایق قرار گرفته است، به دلیل اختلاط بهتر جریان سیال گرم و سرد، یکنواخت‌تر از حالتی است که نزدیک به دیواره شار غیریکنواخت قرار می‌گیرد. دمای میانگین سطح بیرونی لوله گیرنده در عدد رینولدز ۸۰۰۰ برای آشوبگر در موقعیت نزدیک به دیواره عایق، ۸۰۶ درجه کلوین و برای آشوبگر در موقعیت نزدیک به دیواره شار غیریکنواخت، ۸۳۶ درجه کلوین است. همچنین عدد ناسلت Nu برای آشوبگر در موقعیت نزدیک به دیواره عایق حدود ٪۸ بیشتر از دیواره شار حرارتی غیریکنواخت است.

واژه نامه

محاسبات چیدمان میدان هلیوستات	HFLCAL
توزیع تابش خورشیدی	sunshape

فهرست علائم

علائم انگلیسی

مساحت کلی آینه‌های هلیوستات	A_m
ظرفیت گرمایی ویژه	c_p
فاصله تا نقطه هدف	D
ضریب اصطکاک، فاصله کانونی	f
ضریب میرایی	f_{at}
ضریب انتقال حرارت جابجایی	h
ابعاد تصویر در صفحه مماسی	H_t
تابش مستقیم خورشیدی	I_D
انرژی جنبشی آشفتگی	k
ضریب هدایت گرمایی	K
طول لوله گیرنده	L
عدد ناسلت	Nu
سرعت	u،v،w
فشار	P
عدد رینولدز	Re
دما	T
ابعاد تصویر در صفحه طولی	W_s
مختصات کارتزین	x،y،z

علائم یونانی

چگالی	ρ
ویسکوزیته	μ
اتلاف آشفتگی	ε
انحراف موثر در HFLCAL	σ_{HF}
خطای ردیابی	σ_{sun}
انحراف موثر	σ_{bq}
خطای شیب آینه	σ_{ast}
بازتاب‌پذیری موثر آینه‌ها	τ

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] P. Dutta, "High temperature solar receiver and thermal storage systems", *Applied Thermal Engineering*, vol. 124, pp. 624–632, (2017).

[2] L. Zhang, J. Fang, J. Wei and G. Yang, "Numerical investigation on the thermal performance of molten salt cavity receivers with different structures", *Applied Energy*, vol. 204, pp. 966–978, (2017).

[3] Z. Liao, X. Li, C. Xu, C. Chang and Z. Wang, "Allowable flux density on a solar central receiver", *Renewable Energy*, vol. 62, pp. 747–753, (2014).

[4] C.K. Ho and B.D. Iverson, "Review of high-temperature central receiver designs for concentrating solar power", *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 835–846, (2014).

[5] Y. Hao, Y. Wang and T. Hu, "The flow distribution in the parallel tubes of the cavity receiver under variable heat flux", *Applied Thermal Engineering*, vol. 108, pp. 641–649, (2016).

[6] S.M. Besarati, D. Yogi Goswami and E.K. Stefanakos, "Optimal heliostat aiming strategy for uniform distribution of heat flux on the receiver of a solar power tower plant", *Energy Conversion and Management*, vol. 84, pp. 234–243, (2014).

[7] Q. Yu, Z. Wang and E. Xu, "Analysis and improvement of solar flux distribution inside a cavity receiver based on multi-focal points of heliostat field", *Applied Energy*, vol. 136, pp. 417–430, (2014).

[8] N. Tu, J. Wei and J. Fang, "Numerical investigation on uniformity of heat flux for semi-gray surfaces inside a solar cavity receiver", *Solar Energy*, vol. 112, pp. 128–143, (2015).

[9] M. Binotti, P.D. Giorgi, D. Sanchez and G. Manzolini, "Comparison of different strategies for heliostats aiming point in cavity and external tower", *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 138, pp. 021008-1–021008-11, (2016).

[10] A. Salomé, F. Chhel, G. Flamant, A. Ferrière and F. Thiery, "Control of the flux distribution on a solar tower receiver using an optimized aiming point strategy: Application to THEMIS solar tower", *Solar Energy*, vol. 94, pp. 352–366, (2013).

[11] T. Ashley, E. Carrizosa and E. Fernández-Cara, "Optimisation of aiming strategies in solar power tower plants", *Energy*, vol. 137, pp. 285–291, (2017).

[12] K. Wang, Y.L. He, Y. Qiu and Y. Zhang, "A novel integrated simulation approach couples MCRT and Gebhart methods to simulate solar radiation transfer in a solar power tower system with a cavity receiver", *Renewable Energy*, vol. 89, pp. 93–107, (2016).

[13] J. Pacio and T. Wetzel, "Assessment of liquid metal technology status and research paths for their use as efficient heat transfer fluids in solar central receiver systems", *Solar Energy*, vol. 93, pp. 11–22, (2013).

[14] L. Marocco, G. Cammi, J. Flesch and T. Wetzel, "Numerical analysis of a solar tower receiver tube operated with liquid metals", *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 105, pp. 22–35, (2016).

[15] C. Zou, Y. Zhang, Q. Falcoz, P. Neveu, C. Zhang, W. Shu, and S. Huang, "Design and optimization of a high-temperature cavity receiver for a solar energy cascade utilization system", *Renewable Energy*, vol. 103, pp. 478–489, (2017).

[16] L. Yang, R. Zhou, Jin, X., Ling, X., Peng, H., "Experimental investigate on thermal properties of a novel high temperature flat heat pipe receiver in solar power tower plant", *Applied Thermal Engineering*, vol. 109, pp. 610–618, (2016).

[17] K. Kanatani, T. Yamamoto, Y. Tamaura and H. Kikura, "A model of a solar cavity receiver with coiled tubes", *Solar Energy*, vol. 153, pp. 249–261, (2017).

[18] A. Mwesigye, T. Bello-Ochende and J.P. Meyer, "Heat transfer and thermodynamic performance of a parabolic trough receiver with centrally placed perforated plate inserts", *Applied Energy*, vol. 136, pp. 989–1003, (2014).

[19] Y. Liu, W-J. Ye, Y-H. Li and J-F. Li, "Numerical analysis of inserts configurations in a cavity receiver tube of a solar power tower plant with non-uniform heat flux", *Applied Thermal Engineering*, vol. 140, pp. 1–12, (2018).

[20] M. Allam, M. Tawfik, M. Bekheit and E. El-Negiry, "Heat transfer enhancement in parabolic trough receivers using inserts: A review", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 28, (2021).

[21] P. Liu, Z. Dong, H. Xiao, Z. Liu and W. Liu, "A novel parabolic trough receiver by inserting an inner tube with a wing- like fringe for solar cascade heat collection", *Renewable Energy*, vol. 170, pp. 327-340, (2021).

[22] Y. Qiu, M. Li, M-J. Li, H. Zhang and B. Ning, "Numerical and experimental study on heat transfer and flow features of representative molten salts for energy applications in turbulent tube flow", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 135, pp. 732-745, (2019).

[23] W.Q. Tao, *Numerical Heat Transfer*, second ed., Xi'an Jiaotong University Press, Xi'an, (2001).

[24] P. Schwarzbölz, M. Schmitz and R. Pitz-Paal, *Visual HFCAL – a software for layout and optimization of heliostat fields*, Solar PACES, Berlin, (2009).

[25] F.J. Collado, "One-point fitting of the flux density produced by a heliostat", *Solar Energy*, vol. 84(4), pp.673–684, (2010).

[26] V. Gnielinski, "New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow", *International Journal of Chemical Engineering*, vol. 16, pp. 359–368, (1976).